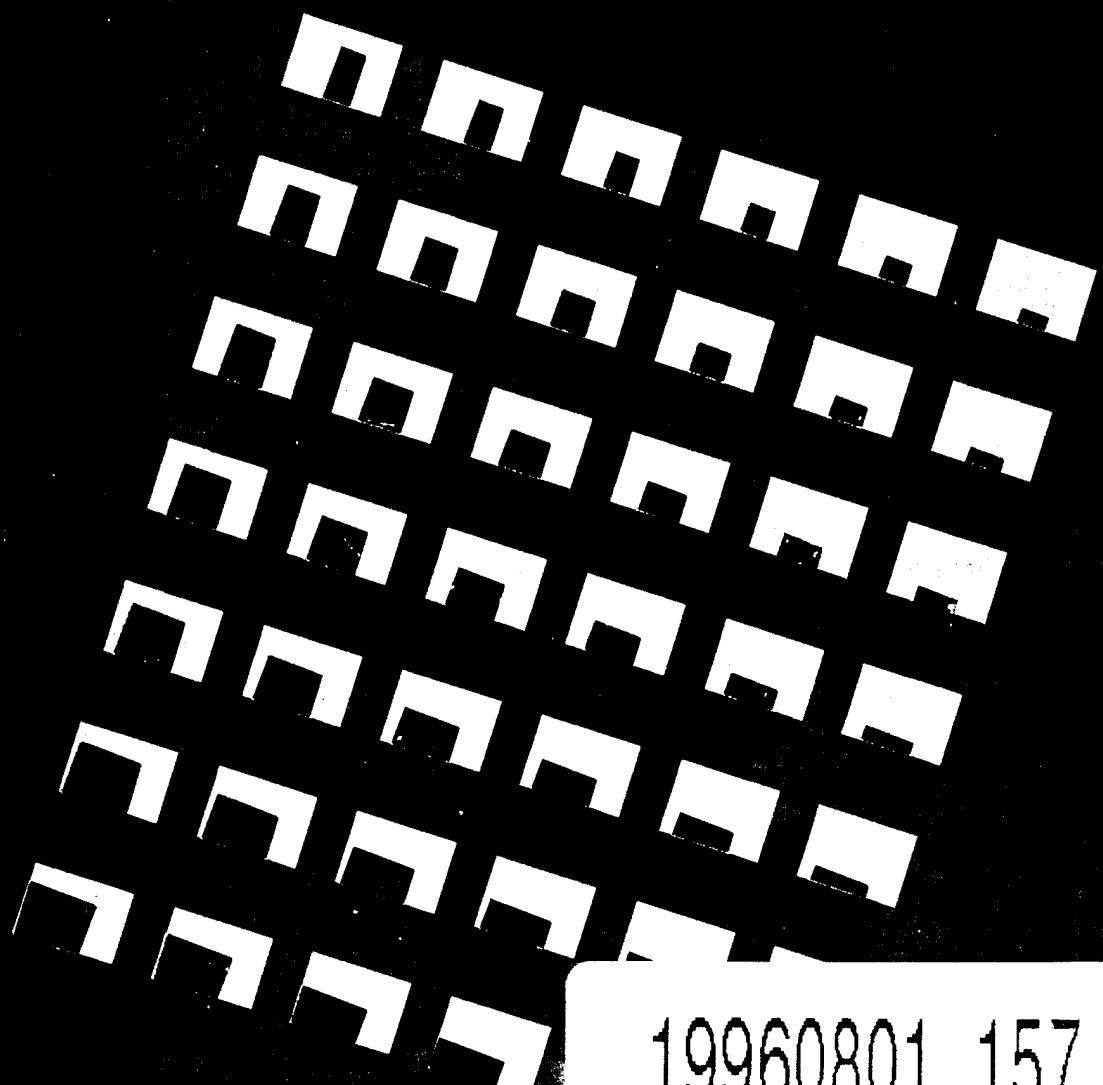


TNO-rapport
PML 1995-A100

Wapenontwikkelingen en consequenties hiervan voor bunkers

TNO Prins Maurits Laboratorium



Wapenontwikkelingen en consequenties hiervan voor bunkers

TNO Prins Maurits Laboratorium

DISTRIBUTION STATEMENT A

Approved for public release.
Distribution Unlimited

Lange Kleiweg 137
Postbus 45
2280 AA Rijswijk

Telefoon 015 2842 842
Fax 015 2843 958

Datum
juni 1996

Auteur(s)
Ir. R.M.M. van Wees

Rubricering
Vastgesteld door : Ir. D. Boon
Vastgesteld d.d. : 3 mei 1996
(deze rubricering wijzigt niet)

Titel : Ongerubriceerd
Managementuitreksel : Ongerubriceerd
Samenvatting : Ongerubriceerd
Rapporttekst : Ongerubriceerd
Bijlage A : Ongerubriceerd

Alle rechten voorbehouden.
Niets uit deze uitgave mag worden
vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt
door middel van druk, fotokopie, microfilm
of op welke andere wijze dan ook, zonder
vooraanstaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd
uitgebracht, wordt voor de rechten en
verplichtingen van opdrachtgever en
opdrachtnemer verwezen naar de
Algemene Voorwaarden voor Onderzoeks-
opdrachten aan TNO, dan wel de
betroffende terzake tussen partijen
gesloten overeenkomst.
Het ter inzage geven van het TNO-rapport
aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 1995 TNO

DTIC QUALITY INSPECTED 1

TNO Prins Maurits Laboratorium is onderdeel
van de hoofdgroep TNO-Defensieonderzoek
waartoe verder behoren:

TNO Fysisch en Elektronisch Laboratorium
TNO Technische Menskunde



Nederlandse Organisatie voor toegepast-
naturwetenschappelijk onderzoek TNO

Managementuittreksel

Titel : Wapenontwikkelingen en consequenties hiervan voor bunkers
Auteur(s) : Ir. R.M.M. van Wees
Datum : juni 1996
Opdrachtnr. : A93/D/428
Rapportnr. : PML 1995-A100

Tot nu toe werd er bij het ontwerp van bunkers en andere vaste beschermingsconstructies voornamelijk rekening gehouden met nucleaire explosies op grote afstand en met conventionele bommen die op enige afstand van de bunker exploderen (near misses). De beelden uit de Golfoorlog lieten zien dat dit uitgangspunt niet meer klopt. De huidige conventionele munitie is veel nauwkeuriger. Om in de toekomst veilige beschermingsconstructies te bouwen zullen de ontwerpeisen dus aangescherpt moeten worden.

In dit rapport is op basis van ongerubriceerde gegevens gekeken wat de capaciteiten zijn van de huidige conventionele wapens, en welke ontwikkelingen er in de nabije toekomst te verwachten zijn. Voor zover mogelijk is zijn hieruit de implicaties voor de ontwerpeisen van een vaste beschermingsconstructie getrokken. Verder kan hiermee bepaald worden of een bestaande constructie ook in de toekomst nog voldoende bescherming biedt.

De huidige dreiging wordt bepaald door bommen die door vliegtuigen afgeworpen worden. De bommen zijn gestuurd, zodat de trefkans vrijwel 100% is. De bommenwerpers zijn tamelijk kwetsbaar voor luchtverdediging. Verder zijn er kleine aantallen wapens die een groter bereik hebben, namelijk raketten en kruisvluchtwapens. Het penetratievermogen van de meest geavanceerde bommen is verbeterd ten opzichte van conventionele bommen (tot circa 8 m in beton), onder andere door raketaandrijving van de bom in de eindfase.

Voor de nabije toekomst, tot circa 2025, is een aantal ontwikkelingen te verwachten. Het penetratievermogen van bommen zal verder toenemen, maar niet met een grote factor. Het zal met alle wapens mogelijk zijn om het doel precies te raken. Dat wil zeggen: het punt op het aardoppervlak. Het blijft moeilijk om recht door grond te penetreren. Het grootste verschil met de huidige situatie zal zijn dat veel meer wapensystemen met een lange dracht zullen zijn, met name kruisvluchtwapens. Deze kruisvluchtwapens kunnen 'goedkoop' gebouwd worden en vereisen geen specialistische technologie, zodat ze voor elke tegenstander beschikbaar zijn. Ze zijn niet erg kwetsbaar voor de huidige luchtverdediging.

Door de ontwikkeling van nauwkeurige geleide en doelzoekende wapens zal bij het ontwerp van een belangrijke installatie tegenwoordig altijd uitgegaan moeten worden van een voltreffer. Om de penetratie en de explosie te weerstaan wordt een diepte van 20 m onder rots of beton veilig geacht, ook voor de toekomst. Andere

gevolgen voor het ontwerp is dat men rekening moet houden met een FAE explosie in de luchtinlaten en dat toegangen versperd kunnen worden (door mijnen of door een treffer). Vanzelfsprekend kunnen alle bovengrondse delen van de constructie (antennes bijvoorbeeld) gemakkelijk vernietigd worden.

Door deze ontwikkelingen wordt het moeilijk om veilige beschermingsconstructies te bouwen. Op het ogenblik bieden alleen faciliteiten diep in rots een gegarandeerde bescherming. Zelfs die faciliteiten kunnen nog in hun functioneren belemmerd worden: door de ingangen te treffen. Het is wel mogelijk om constructieve maatregelen te treffen die het de vijand moeilijk maken de faciliteit te vernietigen, onder andere door ondergronds te bouwen.

Samenvatting

In het verleden werden bunkers ontworpen op de dreiging van een 'near-miss'. De huidige wapens zijn echter trefzeker. Dit rapport geeft een overzicht van de capaciteiten van de huidige en toekomstige wapens en trekt conclusies voor wat betreft de ontwerpcriteria voor toekomstige bunkers.

De meest belangrijke ontwikkelingen hebben in de navigatie en doelzoeksysteem plaatsgevonden en in op afstand gelanceerde wapens. De penetratiediepte neemt ook toe. Het is technisch mogelijk dat de toekomstige dreiging voor bunkers bestaat uit een zwerm van nauwkeurige kruisvluchtwapens, die met diep penetrerende bommen zijn uitgerust. Alleen diep begraven ondergrondse constructies zijn veilig voor deze dreiging.

Inhoud

Managementuitreksel	2
Samenvatting	4
1 Inleiding	6
2 Capaciteiten huidige en toekomstige conventionele wapens	7
2.1 Inleiding	7
2.2 Gevechtslading	7
2.3 Penetratoren	8
2.4 Navigatie, sensoren, doelzoekers en ontstekers	11
2.5 Airframes en voortstuwing	13
3 Huidige en toekomstige dreiging voor beschermingsconstructies	16
3.1 Vroeger	16
3.2 Nu	16
3.3 Nabije toekomst	16
4 Implicaties voor beschermingsconstructies	18
4.1 Absoluut niet meer voldoende om te ontwerpen op een near-miss	18
4.2 Mogelijke tegenmaatregelen	18
5 Referenties	21
6 Afkortingen	23
7 Ondertekening	24
Bijlage	
A Penetratieformule voor 'earth penetrating bombs'	

1 Inleiding

Tot nu toe werd er bij het ontwerp van bunkers en andere vaste beschermingsconstructies praktisch alleen rekening gehouden met nucleaire explosies en met conventionele bommen die op enige afstand van de bunker exploderen (near misses). De beelden uit de Golfoorlog lieten zien dat dit uitgangspunt niet meer klopt. De huidige conventionele munitie is veel nauwkeuriger. Om in de toekomst veilige beschermingsconstructies te bouwen zullen de ontwerpeisen dus aangescherpt moeten worden. In dit rapport is op basis van ongerubriceerde gegevens gekeken wat de capaciteiten zijn van de huidige conventionele wapens, en welke ontwikkelingen er in de nabije toekomst te verwachten zijn. Voor zover mogelijk zijn hieruit de implicaties voor de ontwerpeisen van een vaste beschermingsconstructie getrokken. Hierbij is alleen naar de technische aspecten van de dreiging gekeken, niet naar de militair tactische en strategische aspecten.

2 Capaciteiten huidige en toekomstige conventionele wapens

2.1 Inleiding

De capaciteit van een wapensysteem en de dreiging die hiervan uitgaat wordt bepaald door een veelheid van factoren. De belangrijkste hiervan zijn:

- trefkans, waaronder valt:
 - de capaciteit van het wapensysteem om het doel te herkennen;
 - CEP¹ (nauwkeurigheid van het wapen);
 - onderscheppingskans;
- penetratievermogen;
- gevechtslading;
- aantal van deze wapensystemen, wat hoofdzakelijk bepaald wordt door de kosten van het wapensysteem en de benodigde ondersteuning:
 - kosten van het wapensysteem zelf;
 - kosten die gemaakt moeten worden om het wapen op het lanceerpunt te brengen;
 - informatie die vergaard moet worden over het doel.

Belangrijke technologieën die deze factoren bepalen zijn:

- gevechtslading;
- navigatiesystemen, sensoren en doelzoekers;
- penetratoren;
- airframes en voortstuwing.

In het vervolg van dit hoofdstuk wordt een overzicht gegeven van de huidige stand van de techniek in deze technologieën en wat te verwachten is voor de nabije toekomst.

2.2 Gevechtslading

2.2.1 Springstof

De meest gebruikte gevechtslading is springstof. Op het ogenblik zijn dit chemische springstoffen zoals TNT, RDX en HMX. De kracht van springstoffen wordt voor het grootste gedeelte bepaald door de energiedichtheid van de stof. Hierin is slechts een geringe toename te zien geweest sinds WO II. Ook voor de toekomst is geen grote toename te verwachten, tenminste voor chemische explosieven [Higgins

¹ Afkortingen worden verklaard in hoofdstuk 6.

et al., 1990]. Wel zijn er enkele andere stoffen die potentieel als springstof gebruikt kunnen worden (atomair waterstof, anti-materie). Deze stoffen hebben een energiedichtheid die drie tot tien ordes van grootte hoger ligt dan die van chemische springstoffen (dus zelfs hoger dan nucleaire wapens). De toepassing van deze stoffen vereist wel technologische doorbraken.

Een andere ontwikkeling is dat chemische springstoffen steeds ongevoeliger gemaakt worden.

2.2.2 Cluster munitie

De gevechtslading kan uit één enkel wapen bestaan, maar ook uit tientallen submunitieën. Er is al tientallen jaren een ontwikkeling om hoe langer hoe slimmere submunitieën te ontwikkelen en om voor iedere toepassing een op maat gesneden mengsel van submunitieën te gebruiken. Deze ontwikkeling zal zich voortzetten. Voor beschermingsconstructies zijn clustermunitieën alleen van belang omdat ze uitwendige gedeelten kunnen beschadigen en toegang tot de beschermingsconstructie kunnen verhinderen (mijnen).

2.2.3 EMP, HPM

Er bestaan op dit ogenblik methoden om sterke pulsen van electro-magnetische straling op te wekken. Verwacht wordt dat hieruit binnen tien jaar een praktisch toepasbaar wapen ontwikkeld kan worden [Higgins *et al.*, 1990]. Hoe de intensiteit en het spectrum zich tot nucleaire EMP zullen verhouden is nog niet bekend. Dit soort wapens zullen vooral tegen C³I faciliteiten gebruikt worden. Het is niet waarschijnlijk dat deze wapens in een penetrerende gevechtskop geplaatst kunnen worden.

2.2.4 FAE

Munitieën waarin fuel-air explosives worden gebruikt bestaan al meer dan 30 jaar, maar zij worden tot nu toe niet tegen bunkers gebruikt. In potentie kan dit echter wel, door een penetrerende gevechtskop uit te rusten met FAE of door FAE in de luchtinlaten van de bunker te verstuiven. Ontwikkeling van een dergelijk wapen zou binnen korte termijn kunnen plaatsvinden.

2.3 Penetratoren

2.3.1 Basiseisen voor penetrerende bommen

Door Sandia National Laboratory is in de jaren '60 een empirische formule ontwikkeld waarmee de penetratiediepte van bommen in grond en diverse andere materialen geschat kan worden [TM 5-855-1, 1985, equation 4-3]. De formule en de voorwaarden waaronder ze gebruikt kan worden zijn gegeven in bijlage A. Uit de formule blijkt dat de penetratiediepte recht evenredig is met de trefsnelheid en de wortel uit de penetratormassa gedeeld door het trefoppervlak. Dit betekent dat een bom zwaar en slank moet zijn en met een zo hoog mogelijke snelheid moet

treffen.

De bom wordt tijdens het penetreren enorm zwaar belast. Het materiaal van de bom dient daarom een hoge sterke en taaiheid te hebben. Meestal wordt staal gebruikt, maar voor wapens met een beperkt laadvermogen (bijvoorbeeld Tomahawk kruisvluchtwapen) wordt ook wel titanium gebruikt. Het inwendige van de bom wordt blootgesteld aan versnellingen van ongeveer 200.000 m/s^2 bij penetratie in beton. Dit maakt een ongevoelige springstof noodzakelijk. Ook het ontstekingsmechanisme dient zeer robuust te zijn.

De bom moet een zo recht mogelijk pad door de grond volgen om diepe bunkers te treffen. Dit kan door de achterkant van de bom iets breder te maken. Toch zal een bom gemakkelijk uit de koers raken, bijvoorbeeld als hij schuin op een rotsblok treft.

2.3.2 Concepten voor penetratoren, met voorbeelden van bestaande wapens

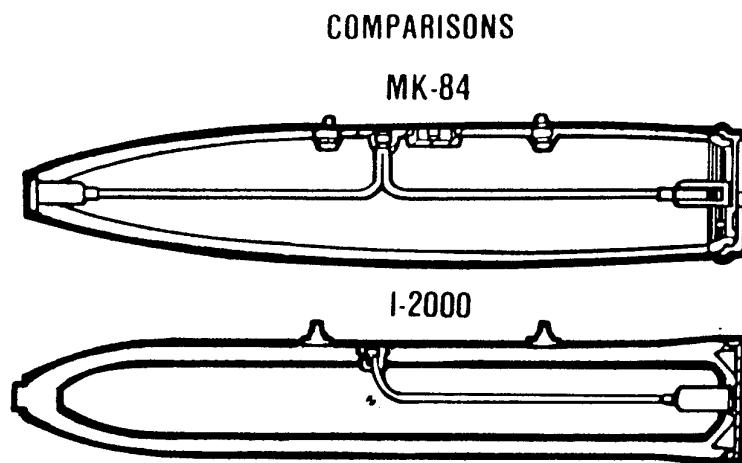
Om bommen dieper te kunnen laten penetreren dan de standaard vrij vallende bommen zijn diverse concepten ontwikkeld [Ullrich, 1995]. Hieronder worden deze concepten beschreven en worden enkele voorbeelden van wapens gegeven.

Standaard bom

De standaard bom bestaat uit een vrij vallende bom. De snelheid wordt verkregen door de snelheid van het vliegtuig bij afwerpen en de bij het vallen verkregen snelheid. Doordat de luchtweerstand bij transsone snelheden sterk toeneemt is de maximum snelheid veelal circa 300 m/s. Crawford *et al.* [1971] geven de penetratiecapaciteit van een reeks van bommen. De nieuwste types presteren niet veel beter. De enige methode om dieper te penetreren is om een zwaardere en/of slankere bom te gebruiken.

I-2000

De I-2000 is de standaard penetrerende bom van de USAF [Goodman, 1991; Beal en Sweetman, 1994; Higgens *et al.*, 1990]. Deze bom is in de Golfoorlog de meest gebruikte bom geweest om de Iraakse bunkers uit te schakelen. Figuur 2.1 geeft een schets van de bom. Deze bestaat uit de BLU-109/B bom met een Paveway 3 laser guidance pakket (GBU-24) of een variant voor glijvluchten (GBU-15), met TV of IIR doelzoeker. De bom heeft een massa van 900 kg, is 2,4 m lang, heeft een diameter van 0,45 m en een wanddikte van 25 mm. Hij bestaat uit één stuk gesmeed hoge sterke staal. Hij kan 2 m beton of 7,5 cm staal penetreren.



Figuur 2.1: BLU-109/B bom (I-2000), zonder sturing [Higgens et al., 1990].

BLU-113A/B, GBU-28

De BLU-113A/B is tijdens de Golfoorlog ontwikkeld. Het oorspronkelijke type bestond uit een gemodificeerde kanonsloop [Janssen Lok, 1994; Morrocco en Fulghum, 1991; IDR 5/1995; Beal en Sweetman, 1994]. Er worden nu 125 stuks van aangeschaft door de USAF. De bom heeft een massa van 2170 kg en kan tenminste 6 m beton of 30 m grond penetreren. De bom kan uitgerust worden met de Paveway 3 laser guidance kit.

Raketversneld

Een bepalende factor voor de penetratiediepte is de trefsnelheid van de bom. Deze kan verhoogd worden door de bom uit te rusten met raketten, die op een bepaald moment ontstoken worden. Dit is een bestaande technologie, maar wordt nog niet veel toegepast. Een voorbeeld is de Russische BetAB-500ShP [Beal en Sweetman, 1994]. Deze bom heeft een massa van 424 kg.

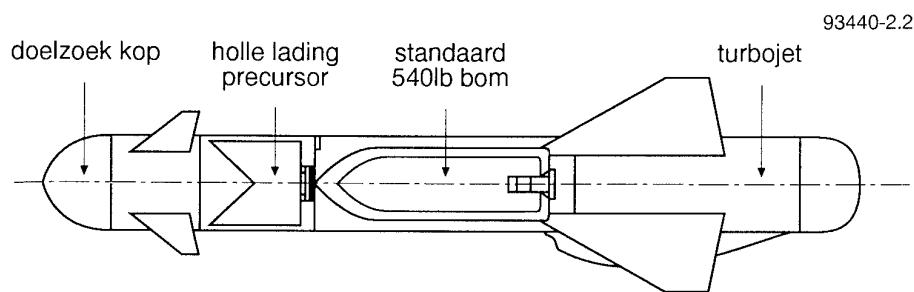
Kanonversneld

Een andere manier om de penetrator een hogere snelheid te geven is om hem uit een kanon te verschieten. Het wapen (kanon met penetrator) wordt afgeworpen als een normale bom, en vlak voor het treffen wordt de penetrator afgevuurd. Dit is een bestaande technologie, maar wordt nog niet toegepast. Een voorbeeld is het DASA/Bofors ontwerp van de KEPD 50 [Beal en Sweetman, 1994]. Dit is een al bestaande turbojet aangedreven kruisvluchtwapen, voorzien van INS/GPS navigatie en IIR doelzoeker. Het kruisvluchtwapen wordt voor de KEPD 50 uitvoering uitgerust met een Davis kanon, dit is een kanon met een reactiemassa. Het zou 4 tot 6 m beton kunnen penetreren.

Holle lading precursor lading

Een andere manier om een grotere penetratiediepte te bereiken is om vóór de penetrator een holle lading te plaatsen. Door deze vlak voor het treffen af te vuren wordt een gat met kleine diameter in het doel geblazen, waardoor de penetrator gemakkelijker kan penetreren. Dit zou de penetratiediepte in beton verdubbelen. Een ander voordeel van dit concept is dat het mogelijk is om onder scherpe hoeken te treffen, zonder kans op ricochet. Een nadeel van het concept is dat de holle lading slechts zo'n twee meter diep gat schiet, ongeacht het materiaal. Dit betekent dat de effectiviteit tegen aardoverdekte doelen nauwelijks toeneemt (de penetrator kan de aarde toch wel doorboren).

Voorbeelden van dit type zijn de BROACH en de KEPD 350. Figuur 2.2 geeft een schets van het BROACH concept. Dit wapen is nog niet in productie.



Figuur 2.2: Het BROACH concept van Royal Ordnance is zowel geschikt voor bommen als raketten. Hier is een raket getoond. Het kan ook met lichtere of zwaardere bommen uitgevoerd worden, en eventueel met twee precursor ladingen [Beal en Sweetman, 1994]. Het zou circa 2 m beton kunnen penetreren.

De KEPD 350 van DASA en Bofors is een turbojet aangedreven kruisvluchtwapen. Het heeft een 500 kg zware penetrator en een precursor holle lading [IDR, 8/1995]. Het heeft geïntegreerde INS/GPS navigatie en een IIR doelzoeker en kan 350 km ver vliegen. Het wapen is bijna uitontwikkeld.

2.4 Navigatie, sensoren, doelzoekers en ontstekers

De grootste vooruitgang sinds WO II is geboekt op het gebied van de doelzoeksysteem en de ontstekers. In WO II werden bommen gebruikt die van grote hoogte afgeworpen werden en daarna vrij vielen. Deze bommen hadden een CEP nauwkeurigheid van honderden meters. Deze 'domme' bommen zijn tot op de dag van vandaag het meest toegepaste type. Door vooruitgang in de bomrichtsysteem in de bommenwerpers en door lager te vliegen is de CEP gereduceerd tot tientallen meters. Voor versterkte doelen, zoals bunkers, is dit volstrekt onvoldoende. Daarom zijn sinds de jaren '60 systemen ontwikkeld waarmee de bom in zijn vlucht bijgestuurd kan worden. Ook de systemen waarmee het doel herkend kan worden zijn sterk in capaciteit toegenomen. Deze systemen zijn ook in omvang en prijs

gereduceerd, zodat ze in het wapen zelf ingebouwd konden worden. Verder zijn navigatiesystemen ontwikkeld waardoor een wapen vanaf grote afstand naar zijn doel toe kan vliegen.

2.4.1 Laser guidance

Laser guidance systemen worden op het ogenblik het meest toegepast. Een voorbeeld hiervan is het Amerikaanse Paveway systeem. Bij dit soort systemen wordt met een laserstraal een (infrarood) lichtpunt op het doel gezet. De laser kan vanuit een vliegtuig gericht worden, maar ook door een man op de grond. De doelzoeker op de bom ziet de heldere lichtpunt en stuurt de bom hierop aan, met behulp van bestuurbare vinnen. Dit systeem heeft een in principe CEP van nul meter, maar de bom dient wel binnen een zekere afstand van het doel afgeworpen te worden en de lichtbron moet op het doel gericht blijven.

2.4.2 IIR en TV, SAR, enzovoort

Bij imaging infra-red (IIR) en TV zit een videocamera (zichtbaar licht of warmtebeeld) in de doelzoekkop. Het beeld wordt doorgegeven naar een mens, meestal de wapenofficier van de bommenwerper, die met dit beeld het doel opzoekt en het wapen erop stuurt. Een alternatief is dat het wapen vóór lancering op het doel gelocked word. Het is ook mogelijk dat de doelzoeker zelf door middel van beeldbewerking en patroonherkenning het doel herkent. Dit vereist wel dat de positie en vorm van het doel van te voren bekend is.

Beeldsensoren en beeldbewerkingssystemen worden in snel tempo krachtiger, kleiner en goedkoper, doordat hier heel veel civiel onderzoek naar wordt verricht. Infrarood en zichtbaar licht systemen hebben het nadeel dat zij alleen goed werken onder redelijke weersomstandigheden. Daarom zijn er diverse andere doelzoeksysteem ontwikkeld. De meest gebruikte is radar en, meer specifiek, synthetic aperture radar (SAR). Deze systemen zijn voorlopig een stuk duurder. De verwachting is dat ook deze systemen in de komende tijd krachtiger, kleiner en goedkoper worden.

2.4.3 Navigatie: INS, GPS

De afgelopen tien jaar zijn goedkope navigatiesystemen ontwikkeld: op laser gyroscopen gebaseerde inertial navigation systems (INS) en op satelliet navigatie gebaseerde systemen (GPS). Met een combinatie van de twee systemen kan een wapen over duizenden kilometers afstand tot op circa twintig meter van het doel gestuurd worden. Dit is niet nauwkeurig genoeg voor versterkte doelen. Daarvoor moet de eindsturing dus overgenomen worden door een doelzoeker.

Voor landmeting en instrumentlandingen van verkeersvliegtuigen is differential GPS ontwikkeld. Hierbij wordt een stationaire GPS zender op een bekende locatie geplaatst. Hierdoor wordt de nauwkeurigheid van GPS sterk verhoogd, wellicht goed genoeg voor versterkte doelen. Voor militaire toepassingen zou dit betekenen dat er clandestien een GPS zender in de nabijheid van het doel geplaatst zou moeten worden, op dezelfde manier als bij een laser aanwijssysteem.

Door de USAF wordt het JDAM systeem ontwikkeld. Dit dient in 1996 gereed te zijn. Het systeem bestaat uit een gecombineerd INS/GPS systeem in een stuurbare staartvin die op bommen gemonteerd kan worden. Dit systeem is in eerste instantie voor de B2 bommenwerper bedoeld. De CEP nauwkeurigheid zal 15 tot 20 m bedragen, en in een latere fase door middel van SAR verbeterd worden tot 7 m. [Sweetman, 1993; Aviation Week & Space Technology, September 27, 1993]

2.4.4 Ontstekers

Voor een optimaal effect moet een bom binninnen de bunker exploderen. Dit vereist dat de ontsteker kan waarnemen of voorspellen wanneer de bom in het inwendige van de bunker is, en natuurlijk dat de ontsteker intact blijft tijdens het penetreren. Voor vele bovengrondse toepassingen is een eenvoudige tijdvertraging voldoende. Voor diepe ondergrondse constructies moet de ontsteker een met lucht gevulde kamer kunnen detecteren. Dit kan door het verschil in versnelling te detecteren als de penetrator een kamer binnentreedt. Een andere methode is om met behulp van een sensor te detecteren dat de penetrator niet meer door grond of beton omringd wordt. Een alternatief is om de diepte bij te houden, als de diepte waarop de bunker ligt bekend is. Dit maakt het ook mogelijk om bij een 'near-miss' de bom vlak naast de bunker te laten detoneren.

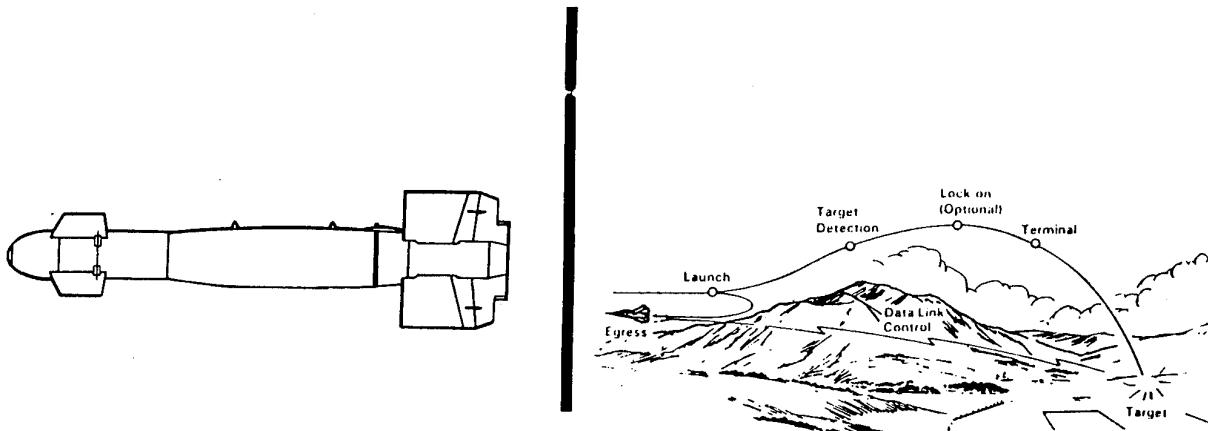
Het is niet bekend in hoeverre de technologie hiervoor beschikbaar is.

2.5 Airframes en voortstuwing

De meest gebruikte methode is om bommen uit een vliegtuig te laten vallen. Als het om een onverdedigd doel gaat is dit de goedkoopste oplossing. In de praktijk liggen bunkers meestal diep in vijandelijk gebied en is er sterke luchtverdediging. Dit betekent dat voor elke bommenwerper een veelvoud aan ondersteunende vliegtuigen mee moet: jagers, gronddoelgevechtsvliegtuigen om luchtverdedigings radar uit te schakelen, vliegtuigen gespecialiseerd in electronische oorlogsvoering, AWACS verkeersleiding, tankers. De kans dat zo'n vliegtuig tijdens de missie neergeschoten wordt is groot. Voor dit probleem zijn er twee oplossingen: vliegtuigen die de luchtverdediging kunnen vermijden, en wapens die van buiten het bereik van de (zwaarste) luchtverdediging gelanceerd kunnen worden.

Voorbeelden van de eerste oplossing zijn de laagvliegende Tornado en 'stealthy' bommenwerpers (B2 en F117).

Voor de tweede oplossing is een grote diversiteit aan gebruikte technologieën. Bommen kunnen worden uitgerust met een sturingspakket, zoals de Paveway. Dit bestaat uit een doelzoeker en stuurbare vinnen. Zoals in figuur 2.3 te zien is, kan de GBU-15 een glijvlucht van meerdere kilometers maken en zelfs enige manoeuvres uitvoeren.



Figuur 2.3: GBU-15, Short range standoff guided bomb, 1000 kg bom (MK-84), TV/IIR via data link [Higgins et al., 1990].

Met raketten kan het wapen vanaf een nog grotere afstand gelanceerd worden, in de orde van 10 tot 100 km. Een bijkomend voordeel is dat raketten vaak hoge snelheden kunnen halen. Een nadeel is dat de raket zelf al een hoge massa heeft, vooral als de raket een groot bereik heeft. Aangezien er niet al te grote en zware wapens onder vliegtuigen gehangen kunnen worden, betekent dit dat raketten meestal een beperkt laadvermogen hebben.

Raketten kunnen natuurlijk ook vanaf de grond gelanceerd worden. Hierbij gaat het dan om ballistische raketten met een bereik van honderden kilometers. Dit zijn dure wapens, zeker als ze het laadvermogen en de nauwkeurigheid moeten hebben die vereist is voor versterkte doelen.

Kruisvluchtwapens bieden een oplossing voor het beperkte laadvermogen. De nieuwste generatie kruisvluchtwapens heeft een bereik van 100 tot 500 km [IDR, 8/1995]. Doordat ze meestal subsonisch vliegen (300 m/s) en turbojet aangedreven zijn, hoeven ze niet veel brandstof mee te nemen. De meeste nieuwe raketten hebben INS/GPS navigatie en een IIR doelzoeker. Deze generatie kruisvluchtwapens heeft een groter laadvermogen en is veel goedkoper dan de vorige generatie (Tomahawk). Dit komt door het veel kleinere vliegbereik, goedkopere navigatiesystemen en doelzoekers, ontwikkelingen in kleine turbojets, en geringere behoefte aan geografische data (de Tomahawk navigeert door middel van een loodrecht naar beneden kijkende radar, en herkent het hoogtepatroon).

Het is te verwachten dat het aantal kruisvluchtwapens in de komende jaren sterk zal toenemen. De benodigde technologie is nu al beschikbaar in ieder land met een luchtvaartindustrie. Ook de prijs zal dalen, tenminste voor de eenvoudige types.

Een tussenvorm tussen raketten en kruisvluchtwapens is de geleide munitiedispenser. Dit zijn wapens die door een vliegtuig gelanceerd worden, en meestal met diverse typen munitie uitgerust kunnen worden. De aandrijving kan door middel van een raketmotor of een turbojet plaatsvinden. Het vliegbereik ligt in de orde van 10 tot 100 km.

In de airframes is een ontwikkeling naar 'stealthy' airframes, dus wapens die een kleine radardoorsnede en een geringe infra-rood signatuur hebben. Verder is er een trend naar hogere manoeuvreerbaarheid.

Voor de voortstuwing voor deze op afstand gelanceerde wapens zijn er diverse oplossingen. Raketvoortstuwing is het eenvoudigst en wordt het meest toegepast. De ontwikkeling hierin is naar krachtigere stuwwerken. Turbojetaandrijving wordt toegepast als geen hoge snelheid bereikt hoeft te worden. Het voordeel is het lage brandstofverbruik, zodat de nuttige lading groter kan zijn. Er is een ontwikkeling naar kleinere en goedkopere turbojet motoren. Ramjets worden gekozen als een hoge snelheid over een lange afstand aangehouden moet worden. Deze zijn namelijk lichter dan raketten. In ramjets is een grote ontwikkeling te verwachten.

Luchtverdediging tegen kruisvluchtwapens zal moeilijk zijn met de huidige middelen. Ze zijn klein en vliegen met hoge subsonische snelheid, ze kunnen 'stealthy' zijn. Ze kunnen laagvliegen, maar voor ondergrondse bunkers zullen ze de laatste tientallen kilometers moeten klimmen om in een duikvlucht te kunnen aanvallen (pop-up manoeuvre). Een 'hard-kill' van een kruisvluchtwapen met een penetrator (dat wil zeggen het compleet vernietigen) zal vrijwel onmogelijk zijn. Wel kan de doelzoeker gemakkelijk beschadigd worden.

3 Huidige en toekomstige dreiging voor beschermingsconstructies

In dit hoofdstuk worden de in het vorige hoofdstuk beschreven capaciteiten van wapens vertaald in een dreiging voor beschermingsconstructies. Hierbij wordt alleen uitgegaan van wat technisch mogelijk is, niet of deze dreiging ook vanuit militair tactisch en strategisch oogpunt realistisch is.

3.1 Vroeger

Vroeger (WO II tot 1970) bestond de dreiging voor beschermingsconstructies met name uit vrij-vallende bommen die uit vliegtuigen geworpen werden. Deze bommen hadden een vrije lage nauwkeurigheid en daardoor een niet al te hoge trefkans. De bommen moesten vanaf grote hoogte dicht bij het doel afgeworpen worden om te kunnen penetreren. Hierdoor waren de bommenwerpers kwetsbaar voor luchtverdediging. De penetratoren waren wel in staat om zware beschermingsconstructies (2 tot 4 m beton) te doorboren.

Verder moest gerekend worden op niet-conventionele wapens: kernwapens die op een meter of honderd tot ontploffing konden komen, en met chemische en bacteriologische wapens en fall-out.

3.2 Nu

De huidige dreiging wordt nog steeds bepaald door bommen die door vliegtuigen afgeworpen worden. De bommen zijn nu gestuurd, zodat de trefkans vrijwel 100% is. Ook is het vliegtuig iets vrijer in de keuze van zijn aanvliegroute en kan de bom iets vroeger afgeworpen worden. De bommenwerpers zijn nog steeds kwetsbaar voor luchtverdediging. Verder zijn er kleine aantallen wapens die een groter bereik hebben, namelijk raketten en kruisvluchtwapens. Het penetratievermogen van de bommen is verbeterd (tot circa 8 m in beton), onder andere door raketaandrijving van de bom in de eindfase.

Verder de niet-conventionele wapens: de kernraketten zijn nauwkeuriger geworden en kunnen nu diep in grond penetreren, maar dit is slechts voor zeer waardevolle geharde doelen van belang (silo's voor kernraketten). Nucleaire EMP is een dreiging geworden door de sterke toename in het gebruik van kwetsbare elektronische apparatuur.

3.3 Nabije toekomst

Voor de nabije toekomst, tot circa 2025, is een aantal ontwikkelingen te verwachten. Het penetratievermogen van bommen zal toenemen, maar niet met een grote

factor. Een diepte van 20 m onder rots of beton wordt veilig geacht om de penetratie en daarop volgende explosie en grondschock te weerstaan [Higgens *et al.*, 1990]. Chemische explosieven zullen nauwelijks krachtiger worden. Het is wel mogelijk dat nieuwe materialen (atomair waterstof, anti-materie) geschikt gemaakt worden voor toepassing als explosief. Ook kunnen de wapens uitgerust worden met andere typen gevechtsladingen, zoals FAE, EMP, HPM. EMP en HPM wapens zullen waarschijnlijk niet in penetrerende koppen geplaatst kunnen worden.

Het zal met alle wapens mogelijk zijn om het doel precies te raken. Dat wil zeggen: het punt op het aardoppervlak. Het blijft moeilijk om recht door grond te penetreren. Geschat wordt dat na 50 m penetratie in grond de afwijking in de orde van 10 m zal liggen.

Het grootste verschil met de huidige situatie zal zijn dat er veel meer wapensystemen met een lange dracht zullen zijn, met name kruisvluchtwapens. Deze wapens hebben voldoende laadvermogen om een diep penetrerende bom mee te nemen, en kunnen ook gemakkelijk penetratie-verhogende middelen dragen, zoals een precursor holle lading of een boosterraket voor de eindfase. Ook autonome raketten, dat wil zeggen raketten die in de eindfase niet door mensen gestuurd worden, zullen een CEP van nul meter hebben. Deze kruisvluchtwapens kunnen 'goedkoop' gebouwd worden en vereisen geen specialistische technologie, zodat ze voor elke tegenstander beschikbaar zijn. Verder kunnen ze vanaf elk platform gelanceerd worden: vrachtvliegtuig, klein schip, truck. Ze zijn niet erg kwetsbaar voor de huidige luchtverdediging.

4 Implicaties voor beschermingsconstructies

4.1 Absoluut niet meer voldoende om te ontwerpen op een near-miss

Door de ontwikkeling van nauwkeurige geleide en doelzoekende wapens zal bij het ontwerp van een belangrijke installatie tegenwoordig altijd uitgegaan moeten worden van een voltreffer. Een andere consequentie van de trefzekerheid van de moderne wapens is dat de bom in de deuropening of een luchtkanaal gemikt kan worden. Er mogen daarom geen zwakke plekken op aanvliegbare posities in de constructie zitten.

Ook is de penetratiecapaciteit toegenomen. Vele wapens kunnen nu circa 4 m beton (of 20 m zand) penetreren, terwijl er speciale wapens zijn die nog dieper kunnen penetreren. Een diepte van 20 m onder rots of beton wordt veilig geacht om de penetratie en de explosie te weerstaan, ook voor de toekomst.

Andere gevolgen voor het ontwerp is dat men rekening moet houden met een FAE explosie in de luchtinlagen en dat toegangen versperd kunnen worden (door mijnen of door een treffer). Vanzelfsprekend kunnen alle bovengrondse delen van de constructie (antennes) gemakkelijk vernietigd worden.

4.2 Mogelijke tegenmaatregelen

4.2.1 Principemogelijkheden

Door deze ontwikkelingen wordt het moeilijk om veilige beschermingsconstructies te bouwen (behalve in Zuid-Limburg). Op het ogenblik bieden alleen faciliteiten diep in rots een gegarandeerde bescherming. Zelfs die faciliteiten kunnen nog in hun functioneren belemmerd worden: door de ingangen, inlagen en uitlagen te treffen. Het is wel mogelijk om het de vijand moeilijk te maken de faciliteit te vernietigen. Dit kan met de klassieke tactieken:

- sterke constructies bouwen, dit maakt het noodzakelijk speciale, zware wapens te gebruiken;
- kleine constructies bouwen, deze zijn moeilijker te raken;
- positie en functie van de faciliteit geheim houden;
- redundantie in faciliteiten.

4.2.2 Sterke constructies

Sterke constructies bouwen zal inhouden:

- betondiktes van 4 m of meer, equivalente gronddiktes (20 m zand bijvoorbeeld) of equivalente gelaagde betongrondconstructies (buster layers);
- bestand tegen de grondschock van een detonatie in de nabijheid;

- bestand tegen EMP, fall-out, bacteriologische en chemische wapens;
- bestand tegen bovengrondse FAE (met name luchtinlaten).

Diep ondergronds bouwen is ook mogelijk. Het nadeel is dat de Nederlandse bodem te slap is om bommen effectief te stoppen. Een bom kan misschien wel honderd meter in veen of klei penetreren. Het enige voordeel van de Nederlandse bodem is dat het ontstekers moeilijk maakt om op de juiste diepte af te gaan. Ontstekers die een plotselinge verlaging in versnelling gebruiken om te detecteren dat de bom een luchtgevulde kamer binnendringt zullen namelijk moeite hebben met zand-veen of zand-klei lagen. Ook de nauwkeurigheid van ontstekers die de versnelling integreren tot een diepte zal hieronder lijden.

4.2.3 Kleine constructies

Kleine constructies bouwen heeft alleen zin voor ondergrondse constructies, of in combinatie met geheimhouding. Als de positie van de faciliteit vanuit de lucht waarneembaar is, kan ze namelijk precies geraakt worden. Penetratie diep in de grond zal een projectiel laten afwijken, zodat de trefkans afneemt als het doel niet al te groot is. De afwijking kan verhoogd worden door blokken beton op het oppervlak, die het projectiel kunnen laten afwijken.

4.2.4 Geheimhouding

Alleen van geboorde ondergrondse faciliteiten zal de precieze positie geheim gehouden kunnen worden. Alle andere zullen waarneembaar zijn vanuit de lucht. Ook van geboorde tunnels zal de precieze positie (positie én diepte) lastig geheim te houden zijn. Bovengrondse faciliteiten waarin de versterkte faciliteit slechts een gedeelte van het totale gebouw beslaat bieden in principe ook een mogelijkheid om de locatie geheim te houden, hoewel het bouwkundig erg moeilijk zal zijn om het versterkte gedeelte verborgen te houden tijdens de bouw.

Het kan doelzoekers moeilijk gemaakt worden door de faciliteit ondergronds te bouwen, waarbij er voor gezorgd wordt dat er geen bovengrondse herkenningspunten zijn. Een voorbeeld is om de faciliteit onder een meer te bouwen. De doelzoeker moet dan met GPS werken, of uitgaan van de positie van een referentiepunt op enige afstand van de faciliteit. De nauwkeurigheid van een dergelijke doelzoeker is minder dan een normale laser geleide of IIR doelzoeker. Verder zullen er minder wapens beschikbaar zijn die de capaciteiten hebben om de faciliteit aan te vallen.

4.2.5 Redundantie

Door vier kleine faciliteiten te bouwen in plaats van één grote centrale faciliteit wordt het de vijand veel moeilijker gemaakt de totale capaciteit uit te schakelen. Redundantie kan ook binnen één faciliteit plaatsvinden. Doordat penetratoren niet erg veel explosieve lading hebben (circa 40% van de massa), zal het mogelijk zijn om compartimentering toe te passen, zoals in een schip. Een faciliteit kan dan bestaan uit meerdere zelfstandige en redundante elementen, gescheiden door blastbestendige muren en deuren.

4.2.6 Voorbeeld

Om de bovenstaande abstracte begrippen concreet te maken wordt een voorbeeld van een mogelijke toekomstige geharde faciliteit in Nederland gegeven.

Een geboorde tunnel van circa 400 m lengte, op een diepte van 40 m. De tunnel is onderverdeeld in onafhankelijk en redundant functionerende compartimenten (met luchtvoorziening en nooduitgang). De precieze locatie en diepte (dat wil zeggen tot op 20 m nauwkeurigheid) van de tunnel is geheim. De tunnel en de apparatuur zijn zeer schokbestendig en kunnen een nabije explosie weerstaan.

Om een dergelijke faciliteit uit te schakelen, is ten eerste een behoorlijke spionage inspanning nodig om de locatie te achterhalen. Verder moeten zware penetratoren gebruikt worden om diep genoeg te komen, terwijl het onwaarschijnlijk is dat deze precies in de tunnel penetreren. Door de compartimentering zijn bovendien meerdere nabije treffers nodig. Wellicht zullen wel zo'n twintig tot vijftig bommen nodig zijn om de faciliteit uit te schakelen. Verder zal het voor de aanvaller vrijwel onmogelijk zijn om vast te stellen of de faciliteit inderdaad vernietigd is.

4.2.7 Alternatief: mobiele installaties

Een andere mogelijkheid is natuurlijk het kiezen voor mobiele bovengrondse installaties in plaats van vaste geharde installaties. Het voordeel van mobiele installaties is de lagere aanschafkosten, terwijl ze moeilijk te vinden zijn voor een vijand. Het nadeel is dat als ze eenmaal gevonden zijn, ze heel gemakkelijk te vernietigen zijn. Verder kost het veel inspanning om ze telkens te verplaatsen. Door de verhoogde eisen die aan vaste geharde installaties gesteld worden zal de afweging in de toekomst eerder in het voordeel van mobiele installaties uitvallen. Anderzijds lijkt het riskant om volledig op één type installatie te vertrouwen. Dit impliceert dat een mix van vaste en mobiele installaties gewenst is.

5 Referenties

Aviation Week & Space Technology,
Precision Bomb programs may merge,
Aviation Week & Space Technology, September 27, 1993.

Beal, C.; Sweetman, B.,
Striking Deep,
Hardened-target attack options grow,
International Defense Review, 7, 1994, pp. 41-44.

Crawford, R.E. *et al.*,
Protection from nonnuclear weapons,
Air Force Weapons Laboratory, AFWL-TR-70-127, Kirtland AFB, N.M., February 1971.

Goodman, G.W.,
Existing USAF bomb takes on new role as primary runway buster,
Armed Forces J. Int., August 1991.

Higgins, C.J.; *et al.*,
A technology forecast of potential conventional weapon threats to fixed land-based facilities in the year 2030,
ARA, NDCS, DNA, July 1990.

IDR,
Improved GBU-28 completes testing,
International Defense Review, 5, 1995, p. 13.

IDR,
European/US stand-off weapons move in parallel,
International Defense Review, 8, 1995, pp. 13-14.

Janssen Lok, J.,
Tests will show way to GBU-28 improvement,
Jane's Defence Weekly, 18 June 1994, p. 17.

Morrocco, J.D.; Fulghum, D.A.,
USAF developed 4,700-lb. bomb in crash program to attack Iraqi military leaders in hardened bunkers,
Aviation Week & Space technology, May 6, 1991.

Sweetman, B.,
Reading the US Air Force bomber roadmap,
IDR Vol. 26, October 1993, p. 791.

TM 5-855-1,
Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapons,
Department of the Army Technical Manual TM 5-855-1, Washington, D.C., 1985.

Ullrich, G.W.,
Evolution of hardened facilities & threats against them,
7th International Symposium Interaction of the Effects of Munitions with Structures, Mannheim, April 1995.

6 Afkortingen

AWACS	Airborne Warning And Control System
BROACH	Bomb Royal Ordnance Augmented CHarge
C ³ I	Command/Control/Communication/Information
CEP	Circular Error Probable, de straal van een cirkel waarin 50% van de schoten zullen treffen
EMP	Electro Magnetic Pulse
GP	General Purpose (bom met circa 50 massapercent springstof, niet sterk genoeg om diep te penetreren in beton)
GPS	Global Positioning System
HPM	High Powered Microwaves
IIR	Imaging Infra-Red
INS	Inertial Navigation System
JDAM	Joint Direct Attack Munition
KEPD	Kinetic Energy Penetrator and Destroyer

7 Ondertekening



Ir. J. Weerheim
Groepsleider



Ir. R.M.M. van Wees
Projectleider/Auteur

Bijlage A Penetratieformule voor 'earth penetrating bombs'

Door Sandia National Laboratory is in de jaren '60 een empirische formule ontwikkeld waarmee de penetratiediepte van bommen in grond en diverse andere materialen geschat kan worden [TM 5-855-1, 1985, equation 4-3].

$$D = 0.0031 \cdot S \cdot N \cdot \sqrt{\frac{W_p \cdot \frac{I}{lb}}{A_p \cdot \frac{I}{in^2}}} \cdot \left((V_s - 100 \cdot \frac{ft}{s}) \cdot \frac{I}{\frac{ft}{s}} \right) ft \quad (A1)$$

Waarin:

- D penetratiediepte;
- S 'target penetrability index', zie tabel A.1;
- N 'nose shape factor', zie tabel A.2;
- A_p doorsnede van penetrator;
- W_p massa van penetrator;
- V_s trefsnelheid van penetrator.

Toepassingsgebied van de formule:

- no. of tests in database:
 - Soil: 530;
 - Ice: 92;
 - Rock: 92;
 - Concrete 137;
 - Other: 6;
- velocity: 200 to 3,300 ft/s;
- weights: 5 to 5,700 lb;
- diameter: 1 to 30 in;
- nose shapes: 12 shapes.

Nauwkeurigheid:

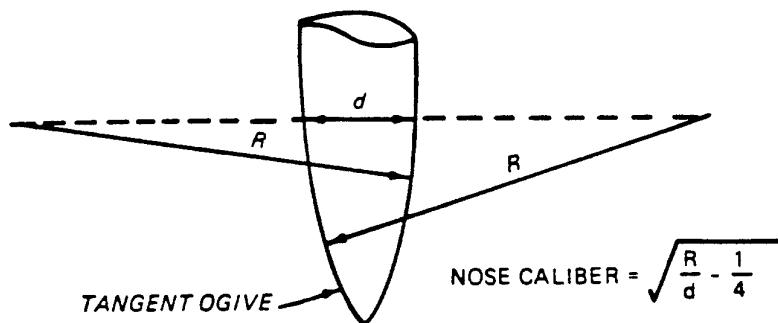
- plus or minus 20% on 91% of data;
- plus or minus 25% on all data.

Tabel A.1: 'Target penetrability index' voor diverse materialen.

Target penetrability index S	Material
2-3	Massive gypsum deposits. Well-cemented coarse sand and gravel. Caliche, dry. Frozen moist silt or clay.
4-6	Medium dense, medium to coarse sand, no cementation, wet or dry. Hard, dry, dense silt or clay. Desert alluvium.
8-12	Very loose fine sand, excluding topsoil. Moist stiff clay or silt, medium dense, less than about 50% sand.
10-15	Moist topsoil, loose, with some clay or silt. Moist medium-stiff clay, medium dense, with some sand.
20-30	Loose moist topsoil with humus material, mostly sand and silt. Moist to wet clay, soft, low shear strength.
40-50	Very loose dry topsoil. Saturated very soft clay and silts, with very low shear strengths and high plasticity. (Great Salt Lake Desert and bay mud at Skaggs Island.) Wet lateritic clays.
1	Rock
3	Sea ice

Tabel A.2: 'Nose shape factor' voor diverse neusvormen.

Nose shape	Nose caliber	N
Flat	0	0.56
Hemisphere	0.5	0.65
Cone	1	0.82
Cone	2	1.08
Cone	3	1.33
Tangent ogive	1.4	0.82
Tangent ogive	2	0.92
Tangent ogive	2.4	1.00
Tangent ogive	3	1.11
Tangent ogive	3.5	1.19



Figuur A.1: Definitie van 'Nose caliber'.

REPORT DOCUMENTATION PAGE

(MOD-NL)

1. DEFENCE REPORT NO. (MOD-NL)	2. RECIPIENT'S ACCESSION NO.	3. PERFORMING ORGANIZATION REPORT NO.
TD95-1578		PML 1995-A100
4. PROJECT/TASK/WORK UNIT NO.	5. CONTRACT NO.	6. REPORT DATE
224493440	A93/D/428	June 1996
7. NUMBER OF PAGES	8. NUMBER OF REFERENCES	9. TYPE OF REPORT AND DATES COVERED
26 (incl. 1 annex, excl. RDP & distribution list)	12	Final

10. TITLE AND SUBTITLE

Wapenontwikkelingen en consequenties hiervan voor bunkers
Weapon development and consequences for shelters

11. AUTHOR(S)

Ir. R.M.M. van Wees

12. PERFORMING ORGANIZATION NAME(S) AND ADDRESS(ES)

TNO Prins Maurits Laboratory, P.O. Box 45, 2280 AA Rijswijk, The Netherlands
Lange Kleiweg 137, Rijswijk, The Netherlands

13. SPONSORING AGENCY NAME(S) AND ADDRESS(ES)

DGW&T/CD/TB, P.O. Box 20701, 2500 ES The Hague, The Netherlands

14. SUPPLEMENTARY NOTES

The classification designation Ongerubriceerd is equivalent to Unclassified.

15. ABSTRACT (MAXIMUM 200 WORDS (1044 BYTE))

Previous bunker designs were based on the threat of a near-miss. Nowadays, conventional weapons are more accurate. This report surveys the capabilities of current and future conventional weapons and draws conclusions about the design criteria needed for future bunkers. The most important developments are in guidance and seekers and in stand-off weapons. Penetration depth is also increasing. It is technically possible that the future threat to bunkers consists of swarms of accurate cruise missiles, equiped with deeply penetrating bombs. Only deeply buried structures are safe against this threat.

16. DESCRIPTORS

IDENTIFIERS

Weapon systems
Threats
Shelters
Design

17a. SECURITY CLASSIFICATION
(OF REPORT)

Ongerubriceerd

17b. SECURITY CLASSIFICATION
(OF PAGE)

Ongerubriceerd

17c. SECURITY CLASSIFICATION
(OF ABSTRACT)

Ongerubriceerd

18. DISTRIBUTION AVAILABILITY STATEMENT

Unlimited Distribution

17d. SECURITY CLASSIFICATION
(OF TITLES)

Ongerubriceerd

Distributielijst*

1*/2* DWOO

3 DWOO

4* HWO-KL

5* HWO-KLu

6* HWO-KM

7/8 DGW&T/CD/TB
Ir. D. Boon

9 KMA
Voorzitter Vakgroep MLW

10 Bureau TNO-DO

11/13 Bibliotheek KMA

14* Lid Instituuts Advies Raad PML
Prof. B. Scarlett, M.Sc.

15* Lid Instituuts Advies Raad PML
Prof. ir. K.F. Wakker

16 TNO-PML, Directeur; daarna reserve

17 TNO-PML, Directeur Programma; daarna reserve

18 TNO-PML, Hoofd Divisie Munitietechnologie en Explosieveiligheid
Dr. D.W. Hoffmans

19/20 TNO-PML, Divisie Munitietechnologie en Explosieveiligheid
Ir. J. Weerheim en Ir. R.M.M. van Wees

21 TNO-PML, Divisie Wapens en Platforms
Dr. Ir. M.P.I. Manders

22 TNO-PML, Documentatie

23 TNO-PML, Archief

* De met een asterisk (*) gemerkte instanties/personen ontvangen uitsluitend de titelpagina, het management-uittreksel, de documentatiepagina en de distributielijst van het rapport.